

パラレル研削法による軸対称非球面の加工に関する研究

著者	佐伯 優
号	3115
発行年	2003
URL	http://hdl.handle.net/10097/8387

氏 名	佐 伯 優	さ え き ま さ る
授 与 学 位	博士 (工学)	
学 位 授 与 年 月 日	平成 16 年 3 月 25 日	
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第 4 条第 1 項	
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械電子工学専攻	
学 位 論 文 題 目	パラレル研削法による軸対称非球面の加工に関する研究	
指 導 教 官	東北大学教授 庄司 克雄	
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 庄司 克雄	東北大学教授 清野 慧
	東北大学教授 加藤 康司	東北大学教授 厨川 常元

論文内容要旨

第1章 序 論

現在多く用いられている非球面レンズは樹脂成形レンズであるが、非球面レンズの適用分野の拡大にともない、レンズの耐環境性と精度の向上のため、組成が安定しているガラスレンズへの移行が望まれている。さらに、映像光学機器において観察画像の高精細化が進んでおり、ガラス製非球面レンズの高精度化が強く求められている。ガラス製非球面レンズの製造法は、プレス成形法と、研削、研磨による直接加工に大別され、いずれの加工法においても、研削が加工の成否を左右する重要な技術である。従来の軸対称非球面の代表的な研削法を図 1 に示す。この方式は、研削点において工作物の回転方向と砥石の周速ベクトルが直交するクロス研削方式である。この方式では研削方向に垂直な砥石断面 1 点で研削が行われるため、砥石断面の形状誤差が加工形状精度に影響を及ぼすことはないが、砥石の摩耗や砥粒の目つぶれが一か所に集中するという欠点がある。本研究では、従来研削法の問題点を解決する手段として、極微粒ダイヤモンド砥石を用いた「パラレル研削方式による非球面研削法(Parallel Grinding Method of Aspherical Surface:以下、パラレル研削法と略称する)(図 2)」を提案し、その実用化技術の確立と従来研削法に対する優位性の検証を目的とする。この方法は従来法と比べて、仕上面粗さと仕上形状精度が良くなるという利点を有するが、欠点として、研削点の移動量

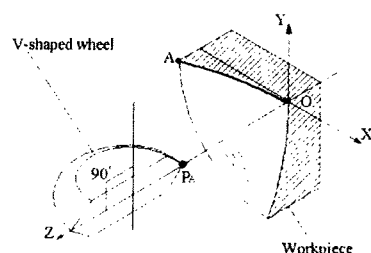


Fig. 1 Conventional grinding method

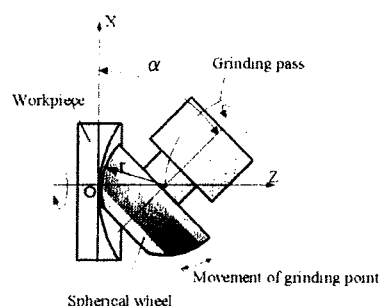


Fig. 2 Parallel grinding method

が大きいので、砥石断面の形状精度を高くし、且つ、広範囲の研削作業面を均一にドレッシングする必要があることが挙げられる。本論文は、6章で構成されており、本論の要旨は次の内容である。

第2章 パラレル研削法

本章では、クロス研削法とパラレル研削法の加工特性を比較評価し、新しい加工法の特徴を明らかにした。実験結果として、超硬合金の平面金型、ガラス非球面レンズの比較評価結果と、双方の加工で使用した砥石の摩耗についての比較評価結果を示した。

2.1 超硬合金の研削仕上面粗さ

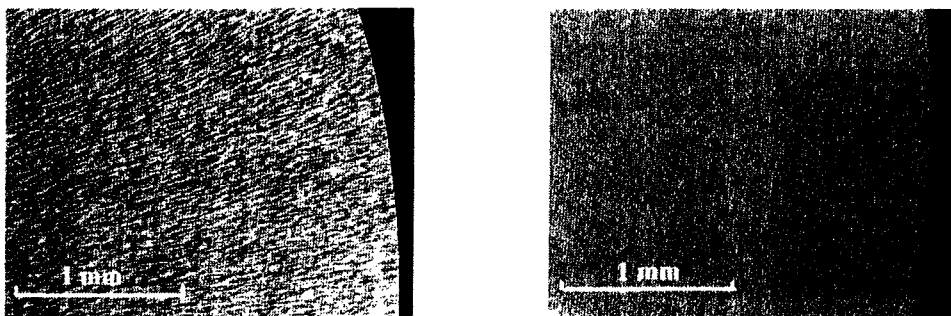
図3に、超硬合金製平面金型の研削仕上面のノマルスキー顕微鏡写真を示す。両加工方式とも $\phi 10\text{mm}$ の球面砥石(SD1500B)を使用した。クロス研削方式では、工作物半径方向に明確な研削条痕が観察される。一方パラレル研削の場合には、円周方向に一樣な研削条痕が見られ、仕上面粗さは測定方向に関わらずクロス研削方式と比較して良好な結果となった。これは、同じ球面砥石を使用する場合でも、クロス研削方式と比較して、パラレル研削の方が有効切れ刃数が多くなるためと考えられる。

2.2 ガラス製非球面レンズ研削精度の比較

加工した非球面レンズは $\phi 5.4\text{mm}$ の凸形状(近似曲率半径13mm)である。パラレル研削法は球面砥石、クロス研削法は算盤玉形状砥石を使用した。砥石種は両方式ともに同一組成のSD4000Bである。双方の研削仕上面には、平面金型加工と同様の研削痕がみられた。また、クロス研削法によって加工したレンズの中央部には、主に砥石設定誤差に起因する削り残し(いわゆる“へそ”)が観察されたが、パラレル研削においては、ほとんど存在しない。

2.3 砥石摩耗量

非球面レンズ研削で累積研削深さ $10\mu\text{m}$ となった時の、砥石形状の変化と研削比を比較評価した。クロス研削で使用した算盤玉形状砥石の砥石半径摩耗は $6.2\mu\text{m}$ で、一方、パラレル研削に用いた球状砥石では、最も摩耗が激しい部分で $0.4\mu\text{m}$ であった。また、クロス研削法の研削比は16.0、パラレル研削法の研削比は15.7



(a) Conventional method

(b) Parallel grinding method

Fig. 3 Nomarski micrograph of ground surface

となり、研削比では両者間に差がないといえるが、パラレル研削に使用した球面砥石の各加工点の摩耗は、従来の方法に比べて格段に少なく、パラレル研削法が高精度な加工に有利であることが証明された。

第3章 球面砥石のツルーイング／ドレッシング

本章では、パラレル研削法に対して球面砥石の使用を前提として、砥石設定誤差が加工精度に及ぼす影響を明らかにした。また、球面砥石のツルーイング／ドレッシング法として CG 法を提案し、ツルーイング／ドレッシング精度に対して、球面砥石の設定誤差が及ぼす影響とツルーイング精度の補正方法、およびドレッシング条件の影響について検討した。

3.1 球面ツルーイング／ドレッシング法

球面砥石のツルーイング／ドレッシング方法として、CG (Curve Generating) 法の適用を検討した。CG 法において Δy が存在するときは、創成される砥石は球面にならない。そのため、ツルーイング後の砥石の形状誤差曲線から最小自乗法により Δy を推定し、補正ツルーイングを行うことにより、より高精度の球面砥石を創成する方法を検討した。その結果、球面誤差は PV 値で $0.4\mu\text{m}$ (砥粒突出含) まで改善した。

また、SEM を用いたステレオ観察による砥粒密度計測の結果、ドレッシング時間 7 min 経過後には砥粒密度は約 15000mm^{-2} で定常となり、良好なドレッシングが行われていることが明らかとなった。

第4章 パラレル研削法による軸対称非球面研削

本章ではパラレル研削法によって、軸対称非球面形状の金型、ガラス製レンズを加工した結果(図 4, 図 5)を示す。さらに、パラレル研削法だけで仕上加工したガラス製非球面レンズを、実際に光学機器に装着して解像力を評価し、本研究で開発した研削法による非球面レンズの性能を明らかにした。

4.1 非球面金型の研削

外径 $\phi 56\text{mm}$ 、近似半径 150mm 凹面の大口徑超硬合金製金型の仕上形状精度は $0.147\mu\text{mP-V}$ 、仕上面粗さは工作物の円周方向では 42nmRy であった。また、外径 $\phi 2\text{mm}$ 、近似半径 3.3mm 凹面の微小径金型の仕上形状精度は 85nmP-V 、仕上面粗さは工作物の半径方向で 70nmRy であった。

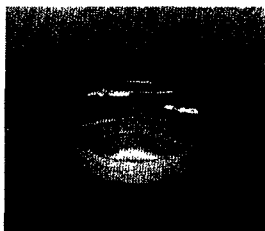


Fig. 4 Photograph of ground aspherical lens



Fig. 5 Form deviation $0.1\mu\text{mP-V}$

4.2 非球面レンズの実装評価

パラレル研削法で研削したガラス製非球面レンズを、実際に光学機器に搭載して、光学特性として解像力を評価した。評価用レンズは第 2 章において加工精度を評価したものをを用いた。その結果、パラレル研削法によるレンズと成形法による通常製品は、ほぼ同等の解像力を有することが示された。

第 5 章 3 軸制御パラレル研削法

最近の非球面レンズの利用分野拡大によって、非球面レンズの設計形状は、接触角（工作物の加工面の接平面と XY 平面のなす角）の非常に浅いレンズや、逆に深いレンズ、また、変曲点を有するものなど多種多様となっている。そのため、これまで述べてきた 2 軸同時制御によるパラレル研削では、砥石の有効幅を十分確保できない場合や、逆に必要な範囲が砥石形状外に出てしまう場合がある。本章では、これに対応するために 3 軸制御パラレル研削法を提案する。

5.1 3 軸制御による非球面レンズ研削実験

研削加工に作用する砥石と工作物の表面積比が一定となるよう、言い換えれば砥石の各加工点の仕事量が一定となるように、B 軸を制御しながらガラス製非球面レンズを研削加工し、砥石の摩耗と加工精度を評価した。その結果、砥石摩耗量は低減し、且つ、ほぼ一定になっていることが確認できた。また、加工したレンズの形状精度は 72nmP-V で、2 軸制御によるパラレル研削法と同等の精度が得られた。これにより、2 軸制御によるパラレル研削法では加工することができない非球面形状に対しても、3 軸制御によるパラレル研削法を適用できることが示された。

第 6 章 結 論

本研究の結論の概要は以下の通りである。

- (1) 超硬合金（平面）とガラス製非球面レンズの加工精度の比較評価により、従来法に対するパラレル研削法の優位性を明らかにした。
- (2) 0.4 μ mP-V 以下の高精度な球面砥石を創成可能な CG 法による球面ツルーイング／ドレッシング法を確立した。
- (3) パラレル研削法により、超硬合金製非球面金型、ガラス製非球面レンズの加工を行い、高精度な研削仕上面が得られることを明らかにした。
- (4) B 軸制御を付加した 3 軸制御パラレル研削法により、球面砥石の断面方向の摩耗を低減し、且つ、一定にできることを示した。これにより、2 軸制御パラレル研削法では加工が困難な非球面形状に対しても、3 軸制御パラレル研削法によって、同等の高精度な加工が可能となった。

論文審査結果の要旨

光学系の微小・軽量化のためには、非球面レンズは不可欠の光学素子である。現在用いられている非球面レンズの多くは樹脂成形品で、金型はダイヤモンドバイトを用いた切削で加工されている。しかし非球面レンズの適用分野の拡大と画像の高精細化に伴って、耐環境性や精度のより高いガラスレンズが強く要求されている。ガラス製非球面レンズは、プレス成形か研削と研磨による直接加工によって製造されるが、いずれの場合も研削が主要な技術となる。しかし研削技術が未成熟であるために、研削だけでは所与の仕上げ面粗さを達成することができない。そのため研磨しろを大きく取らざるを得ず、高加工コストの原因となっている。本論文は、軸対称非球面の新しい研削法を提案し、その優秀性を検証した研究をまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と意義について述べている。

第2章では、従来の研削法の問題点を上げ、その解決策として新たな発想に基づくパラレル研削法を提案し、仕上げ面粗さや砥石摩耗の観点からその優位性を示した。ここで提案したパラレル研削法による非球面加工は、学界、産業界で高く評価され、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の地域コンソーシアムの研究開発で、主テーマに採択された。

パラレル研削法を軸対称非球面の加工に応用する場合、球面砥石が最も適している。そこで第3章では、球面レンズの研削に用いられているCG（Curve Generating）法を応用した球面砥石の成形法を開発し、さらにその補正法を考案して高精度化を実現した。また、球面砥石の中心が工作物の回転軸上に正しく設置されることも重要である。そこで、設定誤差が非球面の加工誤差に及ぼす影響について理論解析を行い、砥石設定誤差の補正法を提案している。

第4章では、市販の非球面加工機をパラレル研削方式に改造し、機上計測した加工誤差に基づいて補正研削を行うシステムを完成させた。そして、研磨工程を経ずに研削工程だけで従来以上の形状精度、仕上げ面粗さが得られることを示し、この研削法の優秀性を実証した。

最近、非球面レンズの利用分野の拡大により、非常にレンズ曲率の大きなもの、あるいは非球面曲線に変曲点をもつものなども現れている。第5章では、これに対応するために、さらに改良を加えた3軸制御パラレル研削法を提案している。

第6章は結論である。

以上、要するに本論文は、従来法に比べより優れた非球面研削法の研究開発に成功した結果をまとめたもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。